

“探究碰撞中的不变量”的深度教学*

何春生 刘永红

(北京市第八十中学 北京 100102)

(收稿日期:2018-11-07)

摘要:教学中,利用实验能发现碰撞过程中参与碰撞的相互作用系统的总动量保持不变,但为什么不受外力作用的系统在碰撞过程中动量守恒,动能和速度不守恒呢?像研究者那样建构物理模型、进行理论探究,能让学生更深入地体验科学方法,开展这样的深度教学不仅能有效地帮助学生解开谜团,还能促进学生核心素养的提高。

关键词:守恒量 碰撞 实验 模型 动量和动能

碰撞是自然界中常见的现象,两个物体碰撞过程中速度都会发生变化,物体的质量不同时,速度变化的情况也不一样,那么碰撞前后会有什么物理量保持不变呢?

1 问题的提出

教科版普通高中课程标准实验教科书《物理·选修3-5》中,如图1所示,用实验探究出了一维碰撞碰撞前后,由参与碰撞的两个物体组成的系统的 $\sum mv$ 保持不变,而两个物体的速度之和与动能之和都有可能发生变化,并由此将物体质量和速度的乘积定义为动量,这样编写教材,能让学生充分体验到寻找守恒量是研究物理学的重要思想方法,也能让学生充分体验到定义动量这个物理量的必要性,但要完成这个实验,最好有气垫导轨、光电门传感器等比较先进的教学设施,而且,这个实验探究的结果也只能说明,碰撞前后系统的动量矢量和相等,并不能精确地说明在碰撞过程中的任意时刻,系统的总动量都相同,所以,要想让学生接受并深刻理解碰撞过程中系统的动量守恒,还应该建构中学生能够接受的理想化模型进行理论探究。

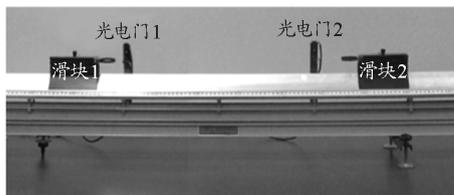


图1 教科书中一维碰撞的探究

2 教学实践

教学中笔者结合学生认知状态,引导学生提取实验的关键因素,忽略次要因素,建构符合中学生认知水平的理想化模型,并利用模型进行过程分析和理论探究,学生不仅能通过实验发现碰撞中的守恒量,还能够利用建构的理想化物理模型对碰撞进行描述、解释和预测。

2.1 学情分析

学生已经学习了牛顿定律和匀变速直线运动等知识,会定量分析处理物体在恒力作用下的运动,会从力和运动关系和能量角度分析问题,对于变力作用下物体的运动问题,高中学生会定性讨论,但不会定量处理,高中学生思维正从直观形象型向逻辑抽象型过渡,但思维还常常与感性经验直接联系,思维过程中仍需具体形象的材料支持。

2.2 模型建构

鉴于学生的认知现状,我们将两个带弹性钢片的滑块抽象成这样的模型:两个不受任何外力,能够发生形变,能在一维空间运动的弹性小球;当两个小球不接触时,两个小球间的相互作用力为零;当两个小球接触时,两个小球间有相互作用力,相互作用力大小是随时间变化的,但其作用效果可等效为一个大小不变的力在同一时间内的作用,如图2所示。

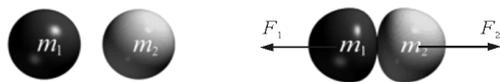


图2 带弹性钢片的滑块抽象模型

* 北京市朝阳区教育科学“十三五”规划课题“高中物理基于心智模型发展的建模教学实践研究”,课题编号:YB1351161

2.3 模型小球的运动过程分析

两小球碰撞前不接触,小球间没有相互作用力,两小球向右做匀速直线运动.设球1的速度大于球2的速度,则球1会追上球2并与球2发生正碰.碰撞过程中球1与球2之间产生相互作用力,球1的受力方向与运动方向相反,所以球1向前做匀减速运动;球2的受力方向与运动方向相同,所以球2向前做匀加速运动.碰撞刚发生时球1速度大于球2的速度,两球发生挤压形变,两质心间距离逐渐减小.碰撞的后半段球2继续加速,球1继续减速,球2的速度将会大于球1的速度,两小球的挤压形变逐渐恢复,两球质心间距离逐渐增加.形变完全恢复后,两小球脱离接触,各自向前做匀速直线运动.由上述分析不难看出,两小球速度相等时,速度大小关系发生逆转,两球质心间距离变大变小也随之发生转折.不难看出当两球速度相等时,两球质心间距离最小.

2.4 利用建构的模型进行理论探究

分别用牛顿定律、运动学的相关规律和动能定理来讨论一下,从状态 I 到状态 II,由不受外力作用的两个小球组成的系统,总动量和总动能的变化情况.

设两小球从状态 I 开始接触,状态 II 对应碰撞中的某一时刻(两小球发生形变),设从状态 I 到状态 II 的时间为 t ,球1和球2在状态 I, II 的速度分别为 v_{11}, v_{21} 和 v_{12}, v_{22} ,球1和球2从状态 I 到状态 II 通过的位移分别为 s_1 和 s_2 ,如图3所示,球1和球2在碰撞过程中的加速度分别为 a_1 和 a_2 .

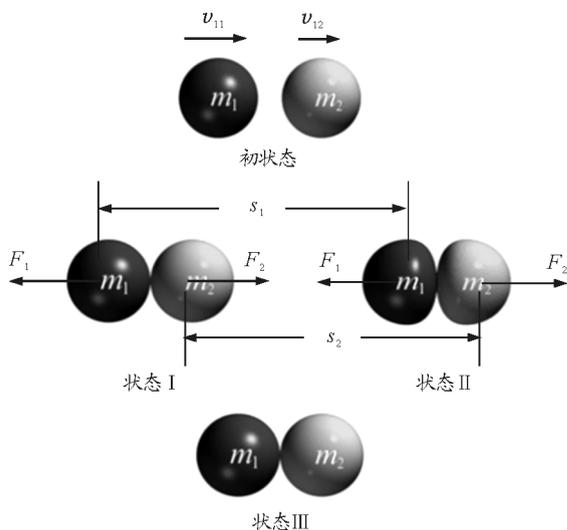


图3 理论分析

2.4.1 用牛顿定律和运动学的相关知识(按教材编排顺序,学生此时还没有学习冲量)讨论系统的动量变化

对球1从状态 I 到状态 II,有

$$a_1 t = v_{12} - v_{11}$$

两边同时乘以 m_1 ,有

$$m_1 a_1 t = m_1 v_{12} - m_1 v_{11}$$

即

$$F_1 t = m_1 v_{12} - m_1 v_{11} \quad (1)$$

同理,对球2从状态 I 到状态 II,有

$$F_2 t = m_2 v_{22} - m_2 v_{21} \quad (2)$$

由牛顿第三定律知

$$F_1 = -F_2 \quad (3)$$

联立式(1)~(3)得

$$m_1 v_{11} + m_2 v_{21} = m_1 v_{12} + m_2 v_{22}$$

又因为上述推导,状态 II 可以是碰撞中的任意时刻,所以,在整个碰撞过程中系统的 $\sum mv$ 始终是保持不变的.

2.4.2 用动能定理讨论系统的动能变化

对球1用动能定理

$$-F_1 s_1 = \frac{1}{2} m_1 v_{12}^2 - \frac{1}{2} m_1 v_{11}^2 \quad (4)$$

对球2用动能定理

$$F_2 s_2 = \frac{1}{2} m_2 v_{22}^2 - \frac{1}{2} m_2 v_{21}^2 \quad (5)$$

又因为球1减小的动能为

$$E_{k1减} = \frac{1}{2} m_1 v_{11}^2 - \frac{1}{2} m_1 v_{12}^2 \quad (6)$$

由式(4)、(6)得:球1的动能减小

$$E_{k1减} = F_1 s_1 \quad (7)$$

球2动能的增加为

$$E_{k2增} = \frac{1}{2} m_2 v_{22}^2 - \frac{1}{2} m_2 v_{21}^2 \quad (8)$$

由式(5)和式(8)得:球2的动能增加

$$E_{k2增} = F_2 s_2 \quad (9)$$

根据牛顿第三定律, F_1, F_2 大小相等,所以

(1) 若 $s_1 = s_2$ 时,由式(7)、(9)得: $\Delta E_{k1减} = \Delta E_{k2增}$,即球1减小的动能等于球2增加的动能.由式(6)、(8)可知,两小球状态 I 时的动能之和等于状态 II 时的动能之和,即

$$\frac{1}{2} m_1 v_{11}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{21}^2 = \frac{1}{2} m_1 v_{12}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{22}^2 \quad (10)$$

(2) 若 $s_1 > s_2$ 时, 由式(7)、(9)得: $\Delta E_{k1\text{减}} > \Delta E_{k2\text{增}}$, 即球1减小的动能大于球2增加的动能. 由式(6)、(8)可知: 两小球状态 I 时的动能之和大于状态 II 时的动能之和, 即

$$\frac{1}{2}m_1v_{i1}^2 + \frac{1}{2}m_2v_{i2}^2 > \frac{1}{2}m_1v_{f1}^2 + \frac{1}{2}m_2v_{f2}^2 \quad (11)$$

(3) 若 $s_1 < s_2$ 时, 由式(7)、(9)得: $\Delta E_{k1\text{减}} < \Delta E_{k2\text{增}}$, 即球1减小的动能小于球2增加的动能. 由式(6)、(8)可知: 状态 I 时系统的动能之和小于状态 II 时两小球的动能之和, 即

$$\frac{1}{2}m_1v_{i1}^2 + \frac{1}{2}m_2v_{i2}^2 < \frac{1}{2}m_1v_{f1}^2 + \frac{1}{2}m_2v_{f2}^2 \quad (12)$$

在碰撞过程中, 前半段球1和球2的挤压形变逐渐增加, 球1的位移大于球2的位移, 球1减小的动能大于球2增加的动能, 两球的动能之和不断减小; 当形变达到最大时, 球1的位移比球2的位移大得最多, 球1减小的动能比球2增加的动能多得最多, 两小球的动能之和最小. 碰撞的后半段, 球1和球2的形变逐渐恢复, 球1在这一阶段的位移小于球2在这一阶段的位移, 球1减小的动能小于球2增加的动能, 两小球的动能之和不断增加. 当形变完全恢复时, 两小球在碰撞过程中通过的总位移相等, 球1减小的总动能等于球2增加的总动能, 系统碰撞前的动能等于系统碰撞后的动能.

因为作用力和反作用力时时刻刻大小相等, 方向相反, 同时产生同时消失, 所以, 碰撞过程中两小球所受的相互作用力和时间的乘积 Ft (冲量) 始终大小相等, 方向相反. 因此, 在碰撞过程中, 不受外力作用的系统动量必定守恒.

又因为作用力和反作用力作用在两个物体上, 碰撞过程中两个物体在同一时段通过的位移不同, 作用力与反作用力对两个物体做的功也不同, 导致两物体的动能变化也不相等, 所以碰撞过程中两物体的动能之和不断发生变化.

因此, 不受外力作用的系统在碰撞过程中, 动量守恒, 但动能不断发生变化.

2.5 利用建构的模型讨论碰撞

(1) 如果在碰撞过程中, 从状态 I 到状态 III 两小球的形变完全恢复. 则在碰撞过程中球1的位移等于球2的位移, 则球1减小的动能等于球2增加的动能, 即系统碰撞前的动能之和等于碰撞后的动能

之和. 在这个过程中, 系统的动量守恒, 碰撞前后系统的动能没有损失. 我们称这种碰撞为弹性碰撞.

(2) 如果碰撞过程中, 两小球形变量最大, 速度相等时, 由于某种原因形变不恢复, 此后两小球以相同的速度共同前进. 此时, 球1的位移比球2的位移大得最多, 则球1减小的动能比球2增加的动能大得最多, 即系统碰撞前动能比碰撞后动能大得最多. 在这个过程中, 系统的动量守恒, 动能损失最多. 我们称这种碰撞为完全非弹性碰撞.

(3) 如果碰撞过程中, 两小球到中间任意状态时 (除速度相等外), 两小球的形变不再恢复. 则在这个过程中球1的位移大于球2的位移, 则球1减小的动能大于球2增加的动能, 即系统碰撞前的动能大于碰撞后的动能. 在这个过程中, 系统的动量守恒, 动能有损失. 我们称这种碰撞为非弹性碰撞.

(4) 虽然我们建构的模型是假设球1和球2间的相互作用力大小保持不变, 但由于作用力和反作用力时时刻刻都保持大小相等方向相反, 所以它们对时间的累积效果相同. 因此, 在相互作用力大小随时间发生变化情况下, 系统的动量还是守恒的.

3 教学反思

(1) 通过实验研究问题, 是物理学对科学研究贡献的重要方法之一. 它极大地推动了科学技术的进步和发展. 但从实验中总结和发现物理规律, 进行科学地分析和解释, 从而寻找更基本、更普遍的物理规律, 也是物理学追寻的目标和重要的研究内容. 中学物理教学中让学生有一些这样的体验和感知, 对促进和提高学生的核心素养是非常有帮助的.

(2) 模型建构是科学思维的重要组成部分, 建构和应用物理模型是研究和解决物理问题的基本方法. 培养学生建构和应用模型的能力, 也是学生学习物理课程的重要目标之一. 教学中应该让学生多一些体验和感受.

参考文献

- 1 翟小铭, 何春生. 中学生物理科学建模素养的三个面向. 物理教师, 2017, 38(12): 2 ~ 6
- 2 张静, 郭玉英, 姚建欣. 论模型与建模在高中物理课程中的重要价值. 物理教师, 2014(6): 4 ~ 5, 10
- 3 何春生. 巧用物理模型提高思维能力. 物理通报, 2014(5): 65 ~ 67